

إمكانات وآفاق معالجة المياه العادمة في استرجاع الموارد والمساهمة في تحقيق أهداف التنمية المستدامة

The potential and prospects of wastewater treatment for resources recovery and its contribution to the achievement of Sustainable Development Goals

نسيمّة أوكيل

مخبر تمويل التنمية في الاقتصاد الجزائري

جامعة أمحمد بوقرة بومرداس (الجزائر)

n.oukil22@univ-boumerdes.dz

عائشة طهراوي

مخبر تمويل التنمية في الاقتصاد الجزائري

جامعة أمحمد بوقرة بومرداس (الجزائر)

tahraoui.aicha@univ-boumerdes.dz

ملخص:	معلومات المقال
تعد معالجة المياه العادمة عملية حيوية تهدف إلى حماية البيئة والصحة العامة. على الصعيد العالمي، لا يتم جمع سوى أقل من نصف إجمالي المياه العادمة، ولا تعالج سوى أقل من خمس هذه الكمية. وقد أفضى هذا الوضع إلى تدهور بيئي حاد في العديد من المسطحات المائية الداخلية والبحرية حول العالم. وفي ظل تزايد ندرة المياه والنمو السكاني، برز نهج حديث يثمن المياه العادمة كمورد قيم بدلا من نفايات تتطلب المعالجة الآمنة فقط. تسعى هذه الدراسة لتسليط الضوء على الإمكانيات الهائلة للمياه في استرداد الموارد وآفاقها. وقد توصلت الدراسة إلى أن النهج الحديث يتيح استرداد المياه، المغذيات والطاقة وهو ما يسمح بتقليل تكاليف التشغيل، توليد تدفقات نقدية، بناء بنية تحتية خضراء للمياه العادمة، تسريع التحول نحو الاقتصاد الأخضر وتحقيق أهداف التنمية المستدامة.	تاريخ الارسال: 2026/06/29 تاريخ القبول: 2026/07/30 الكلمات المفتاحية: ✓ معالجة المياه العادمة ✓ استرجاع الموارد ✓ أهداف التنمية المستدامة
Abstract :	Article info
Wastewater treatment is a vital process intended to protecting public health and the environment. Globally, less than half of all wastewater is collected, and less than one fifth is treated. This situation has resulted in severe environmental degradation in many inland and marine water around the world. With the increasing of water scarcity and population growth, a modern approach has emerged that recognizes wastewater as a valuable resource rather than merely waste requiring safe treatment. This study aims to highlight the immense potential of wastewater in resource recovery and its prospects. The study found that the modern approach enables water, nutrient and energy recovery, Thereby reducing operating costs, generating cash flows, building green wastewater infrastructure, accelerating the transition to a green economy and achieving the Sustainable Development Goals.	Received 29/06/2026 Accepted 30/07/2026 Keywords: ✓ Wastewater treatment ✓ resources recovery ✓ Sustainable Development Goals

مقدمة:

يؤثر تغير المناخ على توافر وتوزيع الموارد المائية، ومع استمرار النمو السكاني والاقتصادي، سيصبح تلبية الطلب على إمدادات المياه والصرف الصحي أمراً متزايد الصعوبة وكثيف الاستهلاك للطاقة. نظراً لأن غالبية الأنشطة المستهلكة للمياه تنتج مياه عادمة. وبحلول عام 2050، سيواجه أكثر من نصف سكان العالم خطر الإجهاد المائي وتدهور جودة المياه وعدم كفاية البنية التحتية لإمدادات المياه والصرف الصحي خاصة مع استمرار نمو المدن. حظيت المياه العادمة باهتمام متزايد وتغيرت النظرة التقليدية لها من نفايات عديمة القيمة تتطلب المعالجة الآمنة إلى نظرة تثنىها وتعتبرها مورداً اقتصادياً واستراتيجياً ذا قيمة كبيرة يسمح باستعادة الموارد الكامنة فيها. وفي ظل الارتفاع المتواصل للطلب العالمي على الطاقة وما يشكله من تهديد لاستدامة الطاقة غير المتجددة، يؤكد اتفاق باريس للمناخ عام 2015 أيضاً على أهمية استرداد الموارد من محطات معالجة المياه العادمة.

الإشكالية: بناء على ما سبق، تتمحور إشكالية الدراسة فيما يلي: ماهي إمكانيات وآفاق معالجة المياه العادمة في استرجاع الموارد وتحقيق أهداف التنمية المستدامة؟

الأسئلة الفرعية: ولمعالجة الموضوع يمكن طرح التساؤلات الفرعية التالية:

- ماهي الموارد الممكن استرجاعها من معالجة المياه العادمة في ظل النهج الجديد؟
 - ماهي المتطلبات الواجب توافرها لنجاح عملية استرداد الموارد من المياه العادمة؟
 - كيف يمكن أن تساهم مرافق استرجاع الموارد في تحقيق الحياد الطاقوي؟
 - كيف يساهم استرجاع هذه الموارد في دعم التحول نحو الاقتصاد الأخضر وتحقيق أهداف التنمية المستدامة؟
 - ماهي أبرز التجارب العالمية الناجحة في مجال استرداد الموارد من المياه العادمة؟
- الفرضيات:** ولغرض الإجابة على إشكالية دراستنا والتساؤلات الفرعية قمنا بصياغة الفرضيات التالية:

- تشكل المياه العادمة خزاناً استراتيجياً للموارد القابلة للاسترداد على غرار المياه باعتبارها عنصراً حيوياً، بالإضافة إلى مختلف المغذيات والمعادن ناهيك عن الطاقة.
- يتطلب استرداد الموارد من المياه العادمة اعتماد نهج جديد في تصميم واستغلال محطات المعالجة يستند أساساً على التكنولوجيات الحديثة والتقنيات والمهارات لاسترداد الموارد.
- يمكن لاسترداد الطاقة النظيفة من المياه العادمة أن يحقق الحياد الطاقوي من خلال تقليل استهلاك الطاقة الأحفورية في الموقع وتخفيض تكاليف التشغيل والمعالجة.
- يساهم النهج الجديد لتدوير المياه العادمة في تحقيق الإدارة المستدامة للموارد المائية مع تعزيز كفاءة استخدامها، بالإضافة إلى الحفاظ على رأس المال الطبيعي وهو ما يعتبر ركيزة لدعم التحول نحو الاقتصاد الأخضر وتحقيق العديد من أهداف التنمية المستدامة بصورة متزامنة.
- هناك العديد من التجارب والنماذج العالمية الرائدة في مجال استرداد الموارد من المياه العادمة التي حققت نتائج جد إيجابية على مختلف الأصعدة، وهو ما شجع العديد من الدول الأخرى على تبنيها للاستفادة من فوائدها المتعددة.

أهداف الدراسة: يشكل بناء بنية تحتية خضراء للمياه العادمة عنصراً جوهرياً في إطار التحول نحو الاقتصاد الأخضر، وقد شهدت العديد من الدول تطوراً في الإدارة المستدامة للمياه العادمة من خلال تعزيز كفاءة الموارد وتطوير تقنيات إعادة التدوير. تعاني البنية التحتية لمعالجة المياه العادمة في الجزائر من تأخر تكنولوجي كبير وضعف في الأداء مع محدودية في إعادة الاستغلال. تهدف هذه الدراسة إلى إبراز التطورات

الحالية والفرص المتاحة في مجال استرداد الموارد من المياه العادمة لا سيما الطاقة النظيفة وذلك من خلال عرض الإطار المفاهيمي وبعض التجارب الدولية الناجحة بغية تعزيز الاستفادة من هذا المورد المهدر والعمل على تصميم وتطبيق حلول متكاملة وقابلة للتطبيق في الجزائر. الدراسات السابقة:

في سياق معالجة هذا البحث وقفنا على مجموعة من الدراسات الآتي ذكرها:

-دراسة (بن عزيزة وآخرون): (Benaziza , Snoussi, & Hadad, 2023) قيم الباحث مدى ملائمة المياه المعالجة لإعادة الاستخدام في أربع محطات تنقية (حجوط، القليعة، الشنوة، وبوسماعيل) وتوصل إلى أن إنشاء هاته المحطات كان غرضه حماية الساحل ولم يصب لإعادة الاستخدام في جدول أعماله وأن نسبة المعالجة لا تتجاوز 56.90%. إضافة إلى أن المياه المعالجة المنتجة في محطة بوسماعيل الحديثة استوفت المعايير الوطنية والدولية المسموح بها بينما تجاوزتها باقي المحطات، مما يجعلها غير صالحة لإعادة الاستخدام حتى في القطاع الزراعي. علاوة على ذلك، أوضحت الدراسة أن إعادة الاستخدام تكاد تكون منعدمة، وتقتصر على استخدام الحماية المدنية من محطة الشنوة لمكافحة الحرائق فقط. وبالتالي فإن العائق الرئيسي أمام إعادة استخدام مياه الصرف الصحي المعالجة هو نقص جودتها، وأكد على ضرورة تطوير عمليات المعالجة لتفعيل إعادة الاستخدام، خاصة في القطاع الزراعي نظراً للإمكانيات الزراعية والسياحية الهامة للولاية.

-دراسة (Rezzoug, Merzougui, & Bouchiba, 2025): هدفت الدراسة إلى تقييم أداء نظام معالجة مياه الصرف الصحي ومحطاته في الجزائر، ومقارنة التقنيات المستخدمة ومدى ملاءمتها وقدرتها على تلبية الاحتياجات المحلية المتزايدة. وقد كشفت الدراسة عن العديد من الثغرات وأوجه القصور التي تحد من إعادة الاستخدام لمياه المياه، من بينها سوء إدارة الحمأة، وتدني معدل إعادة الاستخدام الذي لا يتجاوز 40%، والتأخر التكنولوجي والمادي مقارنة بالدول المجاورة مثل تونس والمغرب، غياب الأطر القانونية الموازية، وتدهور البنية التحتية القديمة، وحالات العطل الفني، ونقص الكوادر المؤهلة.

منهجية الدراسة:

اعتمدت هذه الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي من خلال استعراض الإطار المفاهيمي لاسترداد الموارد من المياه العادمة والاستعانة ببعض الإحصائيات وتحليلها، إلى جانب عرض وتحليل مجموعة من التجارب الدولية التي حققت تقدماً في هذا المجال، بهدف الاستفادة منها في دعم توجه نحو الإدارة المستدامة للموارد المائية وتعزيز الاقتصاد الأخضر.

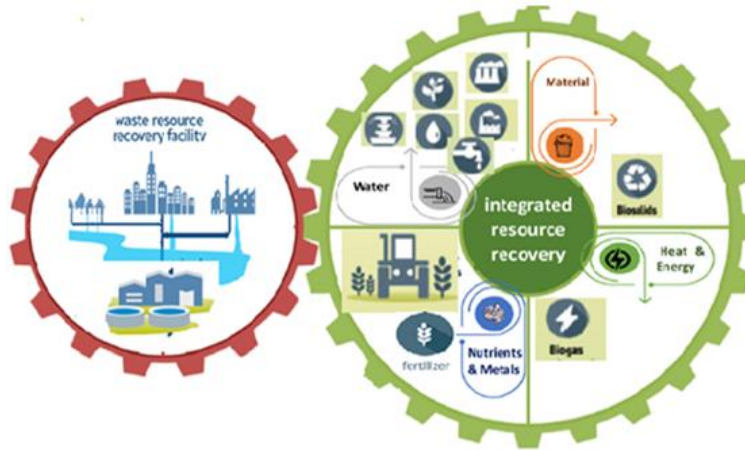
2. مفهوم المياه العادمة

تمثل المياه العادمة المياه المستعملة الناتجة عن مختلف أنشطة المستهلكين سواء من المنازل الخاصة أو المؤسسات التجارية أو المصادر الصناعية إلى جانب مياه الأمطار المتدفقة. تعتمد معالجة المياه العادمة على استقبال هاته المياه في محطات للمعالجة حيث تخضع لسلسلة من المراحل والعمليات، وبعد استكمال المعالجة، يتم تصريف المياه المعالجة إلى وسط مائي مستقبل، غالباً ما يكون نهرًا أو مجرى مائيًا. (Spellman , 2013, p. 22) تشمل البنية التحتية الخاصة بالمياه العادمة شبكات النقل ومحطات المعالجة والمكونات التقنية التي تضمن جمع المياه العادمة ومعالجتها بصورة آمنة. تعد هذه البنية التحتية من الركائز الأساسية لضمان الصحة العامة، حماية البيئة، (Spellman , 2013, p. 8) حماية إمدادات المياه العامة، حماية الحياة المائية، حماية الأراضي المجاورة. (Spellman , 2013, p. 87) غير أن هياكلها غير كافية على المستوى العالمي مما يسمح بتدفق 90% من المياه العادمة نحو المناطق الساحلية فتتحول لمناطق بحرية ممتدة، ولذلك يجب أن يسلط الضوء على البنية التحتية المياه العادمة كغيرها من البنى التحتية للطاقة والمياه والنفايات وذلك وفقاً لرؤية التنمية المستدامة. (Karn, et al., 2023, p. 5159)

3. التحول الجذري في نهج معالجة المياه العادمة

ينظر حاليا إلى المياه العادمة باعتبارها مورداً واعدًا لاستعادة الطاقة والمياه وحتى المغذيات والحمأة الحيوية biosolids (Mohammadi, Tang, & Sillanpää, 2021, p. 2). حيث تطورت أهداف محطات معالجة المياه العادمة، متجاوزةً غايتي تنقية المياه وحماية البيئة والصحة العامة، نحو أهداف إضافية أكثر مراعاة للبيئة، وذلك من خلال استرداد الموارد القيمة منها، واستخلاص الطاقة الكيميائية والحرارية، وتحسين كفاءة استهلاك الطاقة في العملية برمتها. ومن المعلوم أن مختلف عمليات المعالجة داخل المحطة تتميز بكثافة استهلاك الطاقة والمواد الكيميائية، بل إن عمليات إزالة المغذيات بيولوجيا تعتبر الأكثر استهلاكاً. لذا، ينبغي أن يتمحور التحول الجذري في ممارسات معالجة المياه العادمة حول تصميم عمليات معالجة مُحَقَّقة لصافي طاقة موجب، أو محايدة طاقياً على أقل تقدير، مع تعزيز استرداد المياه والطاقة والمغذيات بوصفها موارد بالغة القيمة (Gude, 2015, p. 57). وبمجرد استرداد هاته الموارد، يمكن لها أن تولد تدفقاً إضافياً للإيرادات أو أن تساعد في تقليل تكاليف التشغيل، وبالتالي يحول الصرف الصحي من خدمة مكلفة إلى خدمة ذاتية الاستدامة وذات قيمة اقتصادية. وعليه، يتيح نموذج التحول من محطات معالجة المياه العادمة (WWTP) water resource recovery (WRRF) wastewater treatment plants إلى مرافق استعادة موارد المياه (WRRF) water resource recovery facilities فرصاً جديدة لخلق نماذج أعمال جديدة وأكثر استدامة كما يوضحه الشكل الموالي. كما يمكن أن يساعد القطاع على الانتقال من الاعتماد على التمويل العام التقليدي إلى التمويل المبتكر، والتي من شأنها تحفيز القطاع الخاص على تمويل مشاريع البنية التحتية. (Rodriguez, Serrano, Delgado, Nolasco, & Saltiel, 2020, pp. 30–34)

الشكل 1: الإطار المفاهيمي للاسترداد المتكامل للموارد من المياه العادمة



المصدر: من إعداد الباحثين - بتصرف - بالاعتماد على: (Rodriguez, Serrano, & al, 2020, p. 15)، (Montwedi, et al., 2021, p. 6)

4. دور استرداد الموارد من المياه العادمة في تحقيق أهداف التنمية المستدامة وبناء الاقتصاد الأخضر

تعرف التنمية المستدامة بأنها التنمية التي تلبى احتياجات الحاضر دون المساس بقدرة الأجيال القادمة على تلبية احتياجاتها الخاصة. وقد صيغ هذا التعريف في إصدار الأمم المتحدة لعام 1987 المعنون "مستقبلنا المشترك". وتشكّل أهداف التنمية المستدامة 17 جوهر أجندة 2030 للتنمية المستدامة التي اعتمدها الدول الأعضاء في الأمم المتحدة عام 2015. (Halkos & Gkampoura, 2021, p. 94) لقد اعترفت الأمم المتحدة أن الفجوة في مجال الصرف الصحي لم تحط بالأولوية وكان الأكثر تحدياً بين جميع غايات الأهداف الإنمائية للألفية ولذلك أفردت له غايتين ضمن الهدف السادس في أجندة 2030 نظراً للوعي المتزايد بالتحديات المرتبطة به.

(Andersson, et al., 2020, p. 7) يتمحور الهدف السادس حول ضمان التوافر العالمي والإدارة المستدامة للمياه وخدمات الصرف الصحي. بالإضافة إلى تعزيز كفاءة استخدام المياه وحماية النظم الإيكولوجية المرتبطة بالمياه. وفي الغاية الثانية من الهدف، يركز على الوصول الشامل إلى خدمات الصرف الصحي والنظافة الصحية المُدارة بشكل مأمون (Halkos & Gkampoura, 2021, p. 102). أما الغاية 6.3، فتسعى إلى خفض نسبة مياه الصرف الصحي غير المعالجة إلى النصف وزيادة إعادة التدوير وإعادة الاستخدام الآمن لها بشكل كبير على مستوى العالم. (Qadir, et al., 2020, p. 41) وعليه، ستكون المعالجة والإدارة المستدامتان لمياه الصرف الصحي عبر أنظمة النهج الجديد بالغتي الأهمية لتحقيق الهدف السادس.

وفي هذا السياق، تلعب الموارد الكامنة في المياه العادمة دوراً حاسماً في المساهمة في تحقيق أهداف التنمية المستدامة الأخرى (Qadir, et al., 2020, p. 41) كما يوضحه الشكل الثاني.

الشكل 2: مساهمة استرداد الموارد من المياه العادمة في تحقيق أهداف التنمية المستدامة



المصدر: من إعداد الباحثين

من خلال ماسبق، يتضح بأن تتمين موارد المياه العادمة يتقاطع بشكل مباشر وفعال في تحقيق أهداف التنمية المستدامة الآتية:

✓ الهدف الثالث (الصحة الجيدة والرفاه): حيث تعمل معالجة المياه العادمة كخط دفاع أول لحماية الصحة البشرية من خلال عزل وإزالة المسببات المرضية والسموم الكيميائية قبل وصولها إلى البيئة والمجتمعات، مما يمنع تفشي الأمراض ويحسن من جودة الحياة. (Shehata, et al., 2023)

✓ الهدف السابع (طاقة نظيفة وبأسعار معقولة): من خلال تهمين الكربون العضوي والميثان كحاملين للطاقة المتجددة.

✓ الهدف الثاني عشر (الاستهلاك والإنتاج المسؤولان) عبر استرداد المغذيات وتعزيز كفاءة الموارد والحد من توليد النفايات وإعادة التدوير والاستخدام. (Qadir, et al., 2020, p. 41)

✓ الهدف الثالث عشر (العمل المناخي): من خلال الوصول إلى الحياد الطاقوي داخل المحطة واستغلال غاز الميثان مما يسهم في خفض انبعاثات الغازات الدفيئة، حيث تشير التقديرات إلى أن متوسط الانبعاثات يبلغ 0.8 إلى 1.0 كغ من ثاني أكسيد الكربون لكل متر مكعب من المياه الداخلة.

كما يتقاطع بشكل غير مباشر لتحقيق أهداف التنمية المستدامة الآتية:

✓ الهدف الثاني (القضاء على الجوع): من خلال إعادة تدوير المغذيات وتحويلها إلى أسمدة لدعم الأمن الغذائي.

✓ الهدف التاسع (الصناعة والابتكار والهياكل الأساسية): عبر تصميم سلاسل معالجة معيارية تسمح بتحقيق التكافل الصناعي (Ganesapillai, et al., 2026, p. 8).

✓ الهدف الحادي عشر (المدن والمجتمعات المحلية المستدامة): من خلال تصميم البنى التحتية والنسيج الحضري للمدن لمواجهة التحديات الناجمة عن إدارة ومعالجة المياه العادمة فيها باعتبار أنها مراكز رئيسة لتوليد هذه المياه. (Obaideen, et al., 2022, p. 13)

✓ الهدف الرابع عشر (الحياة تحت الماء): من خلال إزالة المغذيات والملوثات الناشئة التي تسهم في ظاهرة التخثث Eutrophication والتلوث البحري. (Ganesapillai, et al., 2026, p. 8)

✓ الهدف الخامس عشر (الحياة في البر): من خلال حماية جميع الكائنات الحية على اليابسة ومنع تدهور الأراضي ونوعية التربة. (Garduñó-Jiménez, et al., 2023, p. 1)

وتبرز هذه التأثيرات المتداخلة دور مرافق استرداد الموارد من المياه العادمة في تحقيق العديد من أهداف التنمية المستدامة بصورة متزامنة وكذا تجسيد مبادئ الاقتصاد الدائري عملياً والقائمة على القضاء على الهدر وتحويل النفايات إلى مواد ذات قيمة. ويعتمد تحقيق ذلك على وجود الأطر السياسية والتنظيمية، التي بإمكانها تحويل المياه العادمة إلى أصل استراتيجي يساهم مباشرة في تحقيق أجندة التنمية المستدامة العالمية. (Ganesapillai, et al., 2026, pp. 8-9)

يعتبر الاقتصاد الأخضر أداة لتحقيق التنمية المستدامة، ويعرف بأنه الاقتصاد الذي يؤدي إلى تحسين رفاه الإنسان والعدالة الاجتماعية، مع تقليل المخاطر البيئية وندرة الموارد الأيكولوجية. وبصورة بسيطة يكون الاقتصاد الأخضر اقتصاداً منخفض الكربون وكفؤاً في استخدام الموارد، وشاملاً اجتماعياً لجميع الفئات، فهو يسعى للحفاظ على التنوع البيولوجي وخدمات النظم البيئية وتأمين عنصر رأس المال الطبيعي كأصل اقتصادي رئيسي وتحسينه وإعادة بناءه عند الحاجة (UNEP, 2011, p. 2). يعتبر تطوير التكنولوجيا النظيفة والابتكار المستدام كمحركات للاقتصاد الأخضر، يسمح استغلالها في مجال معالجة المياه العادمة بدعم التحول نحو الاقتصاد الأخضر. وفي هذا السياق، يوفر النهج الجديد المعتمد على استرداد الموارد من المياه العادمة فوائد متعددة منها: إعادة بناء الموارد المائية، تحقيق الكفاءة في استخدام الموارد والطاقة وإعادة التدوير، تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري واعتماد الطاقة المتجددة المنتجة في الموقع مما يخفف الانبعاثات، حماية التنوع البيولوجي والنظم البيئية والصحة العامة، ضمان وصول الجميع إلى الخدمات الأساسية.

5. الموارد المسترجعة

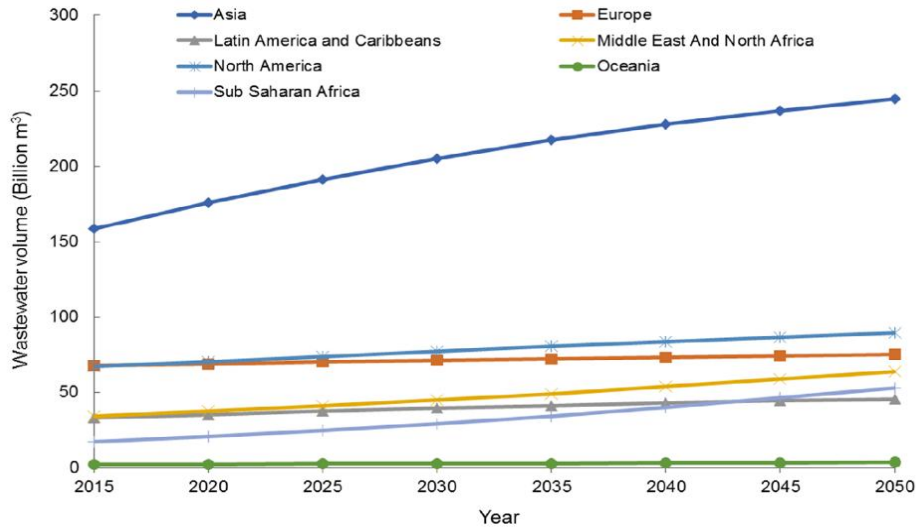
يسمح النهج الجديد لمعالجة المياه العادمة باسترجاع جملة من الموارد الهامة، أهمها:

1.5 استرجاع المياه

تواجه أنظمة المياه العذبة العالمية ضغوطاً متصاعدة حيث تشير التوقعات إلى أنه بحلول عام 2050، سيعيش ما يقرب من 57% من سكان العالم في مناطق تعاني من الإجهاد المائي، وهو مسار تتشكل ملامحه بفعل التقلبات المناخية، والتوسع الحضري السريع، وتزايد الطلب الصناعي. وفي هذا السياق، يمكن للمياه العادمة المعالجة أن تلعب دوراً مهماً في الإدارة المستدامة للمياه وتخفيف الضغط على احتياطات المياه العذبة المحدودة. (Ganesapillai, et al., 2026, p. 9). كما يساعد استخدامها في حماية وترميم النظم الإيكولوجية المرتبطة بالمياه مما يضع المياه في قمة هرم الموارد المستردة. (Halkos & Gkampoura, 2021, p. 102) حيث تمثل تدفقات المياه العادمة العالمية خزاناً هائلاً للمياه، إذ يُنتج منها سنوياً حوالي 380 km³ (380 مليار م³)، ومن المتوقع أن يصل إلى 470 مليار متر مكعب بحلول نهاية حقبة أهداف التنمية المستدامة في عام 2030، وهو ما يمثل زيادة 24% عن الإنتاج الحالي؛ وبحلول عام 2050، ستصل إلى 574 بليون م³، أي بزيادة 51% عن المستوى الحالي. ومن بين مناطق العالم، تعد آسيا أكبر منتج

للمياه العادمة بمقدار 159 مليار م³، وهو ما يمثل 42% من الحجم العالمي ويتوقع ارتفاعه بحلول عام 2030 إلى 44%. بينما تنتج منطقة أمريكا الشمالية وأوروبا 67 مليار م³، 68 مليار م³ على التوالي. في المقابل، تنتج منطقة أفريقيا جنوب الصحراء الكبرى أدنى معدل سنوي للمياه العادمة للفرد (46 م³)؛ بسبب محدودية إمدادات المياه وسوء أنظمة جمع المياه العادمة. (Qadir, et al., 2020, pp. 44-47). ويوضح الشكل (03) توقعات حجم المياه العادمة بحسب المناطق .

الشكل 3: توقعات حجم المياه العادمة بحسب المناطق بحلول عام 2050



المصدر: (Qadir, et al., 2020, p. 44)

تعتبر الزراعة أكبر مستخدم للمياه العادمة المعالجة، سواء للمحاصيل الغذائية أو غير الغذائية، وهي ذات قيمة كبيرة للمزارعين لاحتوائها على المغذيات، كما يمكن استعمالها في إعادة تغذية المياه الجوفية، التخفيف من الجفاف، مياه التبريد أو المعالجة في عدة صناعات (الطاقة، الورق)، وفي المسطحات المائية للمناظر الطبيعية، بحيرات التجديف وصناعة الثلج (Rodriguez, Serrano, Delgado, Nolasco, & Saltiel, 2020, p. 31). ويقود هذا التوسع التطورات في تقنيات المعالجة عالية الدقة التي توفر حماية قوية متعددة الحواجز ضد فئات الملوثات المتنوعة بكفاءة إزالة تتجاوز 99% لمجموعة واسعة من الملوثات الدقيقة وعند دمجها مع عمليات الأكسدة المتقدمة مثل الأشعة فوق البنفسجية/بيروكسيد الهيدروجين والتحفيز بالأوزون. وعلى الرغم من هذا النضج التكنولوجي، تواجه المياه العادمة المعالجة مستويات قبول مجتمعي منخفضة. (Ganesapillai, et al., 2026, p. 9)

2.5 استرجاع المغذيات Nutrients recovery

تعتبر المغذيات مواد ضرورية لدعم ونمو الكائنات الحية، وتشمل عادةً النيتروجين، والفوسفور، والحديد، وبعض العناصر المعدنية النادرة الأخرى. (Spellman, 2013, p. 18) تستعمل هذه الأخيرة في صناعة الأسمدة إذ يعتمد النظام الغذائي العالمي الحالي على الإمداد المستمر لها لتلبية الطلب المتزايد الناتج عن النمو السكاني. غير أن محدودية هاته الموارد الطبيعية تثير المخاوف بشأن مدى التوافر على المدى الطويل فمثلاً، يستخرج الفوسفور من صخور الفوسفات، وهو مورد طبيعي محدود تشير التقديرات الحالية أن احتياطياته العالمية قد تكفي لفترة تتراوح بين 30 و300 سنة فقط. (Shepherd, Sohi, & Heal, 2016, p. 155) تعد كمية المغذيات التي يمكن استردادها من المياه العادمة معتبرة وعالية. (Andersson, et al., 2020, p. 17) وعليه، يمكن لها أن تلعب دوراً مهماً كبديل للأسمدة التجارية. (Zarei, 2020, p. 175) ففي الوقت الحاضر، ينظر إلى المياه العادمة باعتبارها مورداً واعداً

لاستعادة المغذيات. وبالتالي، تعزيز إمدادات الأسمدة من خلال تقنيات استرداد المغذيات. ويترب عن هذا تغييرا في تصميم أنظمة معالجة مياه الصرف التقليدية التي كانت تعتمد أساسًا على التخلص من المغذيات في صورة حمأة نفايات أو إطلاقها على شكل غازات إلى الغلاف الجوي، مما يجعل استعادتها وإعادة استخدامها لاحقًا أمرًا بالغ الصعوبة. (Mohammadi, Tang, & Sillanpää, 2021, p. 2)

يبلغ متوسط تركيز هاته المغذيات في مجموعة من عينات المياه العادمة الحضرية على التوالي: 43.7 ملغم/لتر للنيتروجين، 7.8 ملغم/لتر للفوسفور و 16.5 ملغم/لتر للبوتاسيوم وتشير التقديرات إلى أن هناك حوالي 16.6 تيرغرام من النيتروجين و 3.0 Tg من الفوسفور و 6.3 Tg من البوتاسيوم مدمجة في المياه العادمة المنتجة في جميع أنحاء العالم سنويًا وإجمالي يبلغ 25.9 Tg، حيث $10^9 \text{ kg} = \text{Tg}$ في حين، يبلغ الطلب العالمي على النيتروجين والفوسفور والبوتاسيوم في الزراعة، حاليًا على التوالي: 115.5 Tg، 43.8 Tg و 33.6 Tg على التوالي وإجمالي عالمي يقدر 192.9 Tg. وبالتالي، فإن حوالي 13.4٪ من الطلب العالمي على مغذيات الأسمدة يمكن استكماله بالاسترداد الكامل للمغذيات من المياه العادمة. إذ يمكن للنيتروجين المدمج في المياه العادمة أن يعوض 14.4٪ من الطلب العالمي على النيتروجين كمغذيات للأسمدة؛ الفوسفور 6.8٪ والبوتاسيوم 18.6٪. وبافتراض أن العناصر الغذائية المستردة لها نفس الجودة وقبول السوق مثل الأسمدة الصناعية، فإن استعادة هذه العناصر الغذائية يمكن أن يولد عالميًا إيرادات قدرها 13.6 مليار دولار مع 9.0 مليار دولار من استرداد النيتروجين، 2.3 مليار دولار من الفوسفور و 2.3 مليار دولار من البوتاسيوم. وتشير هذه الأرقام إلى الكميات النظرية القصوى للمغذيات الموجودة في المياه العادمة المنتجة في جميع أنحاء العالم سنويًا وممكنة الاسترداد (Qadir, et al., 2020, p. 45).

يمكن تصنيف تقنيات استرداد المغذيات من المياه العادمة إلى تقنيات كيميائية (مثل الترسيب الكيميائي للستروفييت وتجريد الأمونيا)، وتقنيات فيزيائية (مثل الفصل بالأغشية)، وتقنيات بيولوجية (مثل استخدام الطحالب والنباتات المائية). وتعد تقنية ترسيب الستروفييت من أكثر التقنيات الواعدة بسبب قدرتها على استرداد النيتروجين والفوسفور في صورة سماد عالي القيمة الاقتصادية والزراعية، مع انخفاض مخاطر التلوث وسهولة التخزين والنقل إذ يُنتج في صورة جافة. كما يمكن خلطه مع أنواع أخرى من الأسمدة واستخدامه لفترات تخزين طويلة. يمكن كذلك استخدام فوسفات الكالسيوم الثلاثي غير المتبلور كمادة أولية في إنتاج أعلاف الماشية أو حمض الفوسفوريك. (Montwedi, et al., 2021, p. 8)

إن إزالة هذه المغذيات في الوقت المناسب سيكون كذلك مفيدًا بيئيًا وسيسمح بالحد من ظاهرة التثخث في الموارد المائية السطحية، وقد تم تطوير وتقييم تكنولوجيات مختلفة لاستعادة المغذيات ولكن معظمها مكلفة. (Mohammadi, Tang, & Sillanpää, 2021, p. 2) ومع ذلك، فإن نوع مياه الصرف وخصائصها والتقنية المختارة تؤثر على جودة المواد المستردة وتكاليف المعالجة، ولا يوجد حل مثالي واحد يناسب جميع الحالات، مما يتطلب مزيدًا من الأبحاث لتحسين الكفاءة الاقتصادية والتقنية (Zarei, 2020, p. 175).

يُعد وجود المعادن النزرة Trace minerals مثل الكاديوم، الكروم، المنغنيز، الحديد والنحاس، الرصاص، الزئبق، النيكل والزنك ذا أهمية كبيرة في معظم أنواع المياه. وعلى الرغم من تصنيف العديد من هذه المعادن ضمن الملوثات ذات الأولوية بسبب آثارها البيئية المحتملة، فإنها في الوقت نفسه تمثل عناصر ضرورية لنمو الكائنات الحية واستمرار العمليات البيولوجية. وتوجد العناصر المعدنية الصوديوم، والكالسيوم، والمغنيسيوم، والألومنيوم، والتيتانيوم بتركيزات مرتفعة نسبيًا في حمأة مياه الصرف البلدية، مما يجعلها موردًا يمكن استرداده والاستفادة منه ضمن نهج الاقتصاد الدائري وإدارة الموارد المستدامة. (Montwedi, et al., 2021, p. 5)

3.5 استرجاع الطاقة النظيفة

تسمح هذه العملية بالاستفادة من الطاقة المتضمنة في المياه العادمة وكذا تحقيق وفورات مختلفة في الطاقة نتيجة تقليل الاستهلاك.

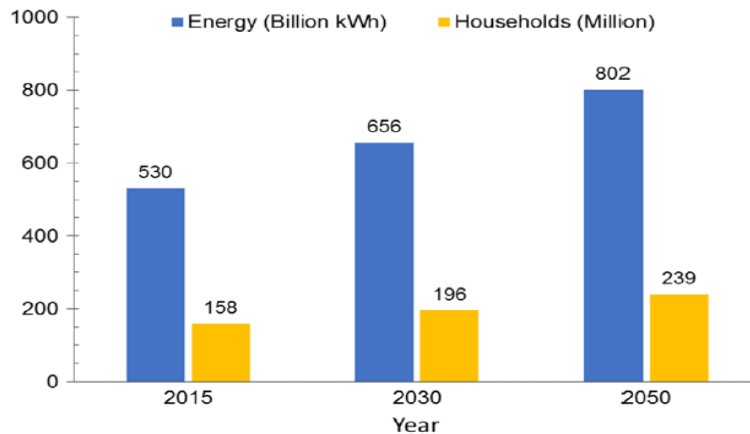
3.5.1 وفورات الطاقة: من المعلوم أن مصادر الطاقة الأحفورية المتاحة في الطبيعة محدودة، ومن المتوقع نضوبها مستقبلاً، فضلاً عن كونها مصدرًا رئيسيًا للغازات الضارة المنبعثة إلى الغلاف الجوي، ولذلك اتجهت الدول إلى استغلال مصادر الطاقة المتجددة. يرتبط استرداد الموارد من المياه العادمة بوفورات طاقوية تتمثل في ثلاثة محاور رئيسية :

- يؤدي استخدام المياه المعالجة بدلاً من الموارد المائية التقليدية إلى تقليل الطاقة اللازمة لاستخراج المياه العذبة ومعالجتها ونقلها . (Kerem & Yuce, 2022, p. 6) والتي تستهلك ما يقارب 7-8% من إجمالي الطاقة المنتجة عالميًا. (Zarei, 2020, p. 176)
- يسهم استرداد المغذيات في تقليل استهلاك الطاقة المرتبط بإنتاج الأسمدة الكيميائية التقليدية .
- استغلال الغاز الحيوي أو غيره من مصادر الطاقة المستردة لتلبية جزء من الاحتياجات الطاقوية للمنشأة يقلل الاعتماد على مصادر الطاقة الأحفورية اللازمة لتشغيل المحطة (Kerem & Yuce, 2022, p. 6).

3.5.2 أنواع الطاقة المسترجعة من المياه العادمة: توضح بعض الدراسات أن حجم المياه العادمة المنتجة يوميًا وما تحتويه من مواد عضوية يمثل مصدرًا مهمًا للطاقة (Montwedi, et al., 2021) . إذ تحتوي على ما يقرب من خمسة أضعاف كمية الطاقة اللازمة لمعالجتها . (Qadir, et al., 2020, p. 47) ويسمح استردادها بتقليل استهلاك الطاقة، خفض تكاليف التشغيل وتقليل البصمة الكربونية لمحطات المعالجة . (Zarei, 2020, p. 176)، وتسمح هذه العملية باسترداد الطاقة في عدة صور نورد أهمها في:

- **الغاز الحيوي: Biogas** يعد إنتاج الغاز الحيوي أحد أكثر التطبيقات الواعدة لاسترداد الطاقة في الموقع، من خلال استغلال الطاقة الكيميائية المخزنة في المركبات العضوية الموجودة في المياه العادمة، عن طريق الهضم اللاهوائي. Anaerobic Digestion. (Qiao, Guo, Fang, Chen, & Yan, 2024, p. 1) علاوة على ذلك، يمثل الغاز الحيوي مصدر طاقة أخضر وبالتالي فإن استخدامه لتوليد الطاقة والحرارة يمكن أن يقلل من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري وملوثات الهواء الأخرى ويمكن أن يسمح للمحطة بالحصول على أرصدة الكربون أو الشهادات البيئية الخضراء (Rodriguez, Serrano, & al, 2020, p. 32). تعزز القيمة الحرارية المرتفعة للغاز الحيوي من استخدامه في توليد الكهرباء وتدفئة المفاعلات، وكوقود بديل لتشغيل المركبات. يتكون هذا الأخير من مزيج غازي من الميثان بنسبة تتراوح بين 50% و70%، وثاني أكسيد الكربون بنسبة تتراوح بين 30% و50%، بالإضافة إلى كميات ضئيلة من غازات أخرى مثل النيتروجين والهيدروجين. كما يمكن إنتاجه كذلك بتقنية الهضم المشترك (Co-digestion) للحمأة مع أنواع أخرى من النفايات القابلة للتحلل الحيوي. وفي هذا السياق، أظهرت تجربة محطة Mossberg لمعالجة المياه العادمة في ألمانيا أن الطاقة والحرارة المستردتين من الهضم المشترك للحمأة تجاوزتا الطلب الداخلي للمحطة خلال فترة تشغيل امتدت لعشر سنوات . (Zarei, 2020, p. 177) ويوضح الشكل (04) آفاق إنتاج الطاقة من المياه العادمة بحلول 2050 .

الشكل 4 : آفاق إنتاج الطاقة من المياه العادمة بحلول 2050.



المصدر: (Qadir, et al., 2020, p. 44)

حيث تقدر قيمة الطاقة في 380 مليار متر مكعب من المياه العادمة بـ 53,2 مليار متر مكعب من الميثان بقيمة سعرية تبلغ 1908 مليار ميغاجول (530 مليار KWh) تكفي لتوفير الكهرباء 158 مليون أسرة معيشية و 239 مليون أسرة بحلول عام 2050 بحسب التوقعات بطاقة تقدر بـ 802 مليار KWh. (Qadir, et al, 2020, p. 47).

الديزل الحيوي: Biodiesel يُعتبر الديزل الحيوي بديلاً واعداً ومستداماً للوقود التقليدي. وتعد الزيوت النباتية المصدر التقليدي الرئيس لإنتاجه. وفي هذا الإطار، يمكن أن تصبح حمأة الصرف الصحي خيار واعد لإنتاج الديزل الحيوي، نظراً لاحتوائها على نسب مرتفعة من الدهون وانخفاض تكلفتها وتوافرها بكميات كبيرة في محطات المعالجة. وتستخدم لاستخلاصه تقنية الأسترة التحويلية (Transesterification) على نطاق واسع (Zarei, 2020, p. 177).

• **البيوميثان: Biomethane** هو غاز حيوي مُنتج من الشوائب وثنائي أكسيد الكربون وكبريتيد الهيدروجين، له قيمة حرارية أعلى ويمكن استخدامه ووقوداً للمركبات المختلفة، كما يمكن ضخه في شبكات الغاز الطبيعي، وهو ما يُطبق بالفعل في عدد من الدول. ومع تزايد الاهتمام باستخدام الغاز الطبيعي المضغوط (CNG) والغاز الطبيعي المسال LNG كوقود لوسائل النقل الثقيلة، يُعد البيوميثان في صورته المطورة بديلاً كاملاً لنظيره من الوقود الأحفوري (Montwedi, et al., 2021, p. 6) (Gude, 2015).

• **الطاقة الهيدروليكية:** يمكن استرداد الطاقة الهيدروليكية من المياه المعالجة الخارجة من محطات معالجة المياه العادمة عبر استغلال فروق الارتفاع وتركيب التوربينات على مسارات الجريان. ففي محطة معالجة المياه العادمة في فيينا بالنمسا، أدى فرق ارتفاع يبلغ 5 أمتار عن التفريغ في نهر الدانوب إلى إنتاج نحو 1.5 مليون كيلوواط ساعة سنوياً، وهو ما يغطي 2.6% من احتياجات المحطة الكهربائية. أما في محطة مقاطعة كلارك بولاية نيفادا الأمريكية Clark County، فقد أتاح فرق منسوب يقارب 400 قدم إنشاء محطة كهرومائية بقدرة 16 ميغاواط تنتج أكثر من 85 مليون كيلوواط ساعة سنوياً، مع إمكانية تصدير فائض الكهرباء إلى الشبكة (Gude, 2015, p. 58).

• **الهيدروجين:** يعد الهيدروجين أحد أكثر مصادر الطاقة صداقةً للبيئة، نظراً لارتفاع محتواه الطاقوي وكفاءته العالية. ويمكن إنتاج الهيدروجين الحيوي (Biohydrogen) من المياه العادمة باستخدام تقنيات متعددة، من بينها التحليل الكهربائي المائي والمعالجات البيولوجية القائمة على النشاط الميكروبي، مثل التخمر المظلم أو التخمر الضوئي. يمثل التخمر المظلم التقنية البيولوجية الأساسية والأكثر أهمية لتحويل المواد العضوية إلى غاز الهيدروجين (Zarei, 2020, p. 177).

● **الطاقة الحرارية Thermal Energy** : تظهر الطاقة الحرارية الموجودة في المياه الخارجة من محطات المعالجة إمكانات استرداد أكبر بنحو 6 إلى 8 مرات مقارنة بالطاقة الكيميائية الموجودة في المياه العادمة. وتقدر كمية الطاقة الكهربائية المكافئة القابلة للاسترداد من هذه الطاقة الحرارية بنحو 1.77 كيلوواط ساعة/م³ لأغراض التدفئة و 1.18 كيلوواط ساعة/م³ لأغراض التبريد ويمكن استغلالها في أنظمة التدفئة والتبريد المركزية للمناطق الحضرية، تدفئة البيوت الزراعية المحمية، تخفيف الحمأة المنزوعة المياه (Hao, Li, Liu, & van Loosdrecht, 2024) ومن الأمثلة الناجحة في هذا المجال أنظمة التدفئة والتبريد المركزية واسعة النطاق في اليابان، والتي تعتمد على الطاقة الحرارية المستخرجة من مياه الصرف، حيث حققت مدينة أوساكا وفورات في استهلاك الطاقة تراوحت بين 20% و 30% بفضل تطبيق هذه التقنية (Zarei, 2020).

● **الطاقة الكهربائية Electric power** : يمكن استرداد الطاقة الكهربائية وإزالة العناصر الملوثة من المياه العادمة باستخدام العمليات الكهروكيميائية الحيوية وفي هذا السياق، تعد خلايا الوقود الميكروبية من التقنيات الواعدة والقابلة للتطبيق لاسترداد الطاقة الكهربائية غير أن تعميم هذه التقنية على نطاق واسع لا يزال يواجه عدة تحديات، من أهمها ارتفاع تكلفة المواد المستخدمة في تصنيع الأقطاب الكهربائية والأغشية، إضافة إلى انخفاض كفاءتها عند درجات الحرارة المنخفضة جداً، حيث يؤدي ذلك إلى تراجع النشاط الأيضي للكائنات الحية الدقيقة المسؤولة عن توليد الطاقة. (Zarei, 2020, p. 178)

6. استعراض بعض التجارب الدولية الناجحة حول تطبيقات النهج الجديد لإدارة المياه العادمة

في إطار البحث عن التجارب الدولية التي تنتهج التوجه الجديد لإدارة المياه العادمة واسترداد الموارد فقد سجلنا العديد من التجارب الناجحة المطبقة من طرف بعض البلدان التي كانت سباقة إليها، وفي هذا السياق نستعرض أهمها:

1.6 التجربة الدانماركية: تقوم العديد من محطات معالجة مياه الصرف الصحي في الدنمارك بشكل متزايد بتحديث أنظمتها عبر إدخال الهضم اللاهوائي للحمأة و/أو الهضم المشترك مع النفايات العضوية، للاستفادة من الغاز الحيوي الناتج في إنتاج الكهرباء والحرارة. ففي Aarhus ثاني أكبر مدينة في الدنمارك، أنتجت محطة معالجة مياه الصرف Marselisborg WWTP في عام 2015 كهرباء تفوق استهلاكها الذاتي بنسبة 30%، وفي الوقت نفسه أنتجت حرارة تزيد بنسبة 80% عن حاجتها، حيث بلغ إجمالي الإنتاج الصافي للطاقة أكثر من 150%، أما في مدينة Odense حققت محطة Ejby Mølle مستويات مماثلة من الإنتاج الطاقوي الصافي. ويعود ذلك بدرجة كبيرة إلى خضوع شركات المياه في الدنمارك لنظام المقارنة المعيارية الإلزامية الذي يقارن الأداء التشغيلي وكفاءة التكلفة عبر قطاع المياه. ومن خلال تقنيات جديدة، تهدف الدنمارك لتحقيق حيادية المناخ زيادة على حيادية الطاقة من خلال التركيز على خفض انبعاثات غازات الدفيئة، بما في ذلك تقليل انبعاثات أكسيد النيتروز (N₂O) من معالجة مياه الصرف الصحي، حيث تساهم هذه الانبعاثات عادةً بنسبة 20-50% من الأثر المناخي الإجمالي لمعالجة مياه الصرف. (state of green & Danish Water Forum, 2016, p. 13)

2.6 التجربة المكسيكية: أدت اللوائح الجديدة لإعادة استخدام المياه العادمة في المكسيك في أحد المشروع المبتكرة في San Luis Potosi في تخفيض استغلالها في محطة الطاقة بدلاً من استخدام المياه العذبة، حيث تستخدم المياه المعالجة من محطة معالجة المياه العادمة القريبة (TENORIO wastewater treatment plant) في أبراج التبريد cooling towers. كانت هذه المياه أرخص بنسبة 33% لمحطة الطاقة مقارنة بالمياه الجوفية وقد أدت إلى توفير 18 مليون دولار لمرفق الطاقة power utility في ست سنوات. أما بالنسبة لمرفق معالجة المياه العادمة WWTP، فقد غطت هذه الإيرادات الإضافية جميع تكاليف التشغيل والصيانة. وتستخدم المياه المعالجة المتبقية لأغراض الزراعة بتوفير مياه أكثر جودة. بالإضافة إلى ذلك، قلل المخطط من استخراج المياه الجوفية بمقدار 48 مليون متر

مكعب في ست سنوات، مما أدى إلى استعادة طبقة المياه الجوفية. (Rodriguez, Serrano, Delgado, Nolasco, & Saltiel, 2020, p. 31)

3.6 التجربة اليابانية: تعد اليابان من الدول الرائدة في استرداد الطاقة من الحمأة الحيوية الناتجة عن معالجة المياه العادمة. وينص قانون الصرف الصحي الياباني لسنة 2015 على إلزام مرافق معالجة الصرف الصحي باستغلال الحمأة الحيوية باعتبارها مصدرًا للطاقة محايدًا كربونيًا ووضعت الحكومة هدفًا لرفع استغلالها إلى 30% عام 2020. تنتج اليابان سنويًا حوالي 2.3 مليون طن من الحمأة الحيوية من خلال نحو 2200 محطة لمعالجة مياه الصرف الصحي، وهي كمية قادرة على توليد ما يقارب 160 جيجاواط ساعة من الكهرباء سنويًا. وفي عام 2016، قامت 91 محطة باسترداد الغاز الحيوي لإنتاج الكهرباء، بينما أنتجت 13 محطة وقودًا صلبًا من الحمأة الحيوية. وتعد مدينة أوساكا مثالًا ناجحًا في هذا المجال، حيث تنتج سنويًا حوالي 6500 طن من وقود الحمأة الحيوية انطلاقًا من 43 ألف طن من حمأة الصرف الصحي الرطبة، ويُستخدم هذا الوقود في توليد الكهرباء وصناعة الأسمنت. (UN WATER & WWAP, 2017, p. 129)

4.6 التجربة التركية: تبرز تجربة أكبر محطة معالجة للمياه المستعملة KABWWTP في منطقة Kahramanmaraş في تركيا نموذجًا متكاملًا لاسترداد الموارد، حيث يتم إجراء المعالجة البيولوجية المتقدمة بأحدث المعدات والوحدات وفقًا لمبادئ المعالجة البيولوجية المتقدمة التي تحتوي على وحدات إزالة النيتروجين والفوسفور والكربون. تستطيع المحطة تغطية نحو 60% من احتياجاتها الطاقوية من خلال استغلال الحمأة في الهضم اللاهوائي لإنتاج 3696 م³ من الميثان يوميًا، مما يسمح بتوليد أكثر من 8400 كيلوواط ساعي من الكهرباء يوميًا، إضافة إلى إنتاج الطاقة الحرارية والأسمدة، وبعدها، تكون المياه العادمة مناسبة للتفريغ المباشر وكذلك إعادة الاستخدام العام. تعكس هاته التجربة النموذجية إمكانيات استرداد طاقة كهربائية نظيفة ومتجددة وصديقة للبيئة من المياه العادمة. (Kerem & Yuce, 2022, p. 4)

5.6 التجربة الأردنية: تعد محطة السمرا لمعالجة المياه العادمة As-Samra Wastewater Treatment Plant، وهي أكبر محطة من نوعها في الأردن، مثالًا بارزًا على ذلك؛ إذ تخدم نحو 2.27 مليون نسمة وتحقق ما يقارب 80% من الاكتفاء الذاتي في مجال الطاقة من خلال مولد يعمل بالغاز الحيوي مدعوم بمخاضم لاهوائي للحمأة إلى جانب استغلال الطاقة الهيدروليكية من خلال تشغيل توربينين مائيين أحدهما قبل المحطة والآخر بعدها. وتغطي هذه التوربينات، التي تبلغ قدرتها 1.7 ميغاواط و2.5 ميغاواط على التوالي، إلى جانب الطاقة المنتجة من الغاز الحيوي الناتج عن هضم الحمأة (9.5 ميغاواط). (UN WATER & WWAP, 2017, p. 95)

6.6 التجربة المصرية: تضم محطة جبل الأصفر لمعالجة المياه العادمة Gabal El Asfar Wastewater Treatment Plant الواقعة على الضفة الشرقية لنهر النيل في القاهرة قدرة معالجة تتجاوز 1.4 مليون متر مكعب يوميًا. وتحتوي المحطة على وحدة توليد مشترك للطاقة والحرارة تعمل بالغاز الناتج عن الهضم اللاهوائي للحمأة، وتوفر ما يصل إلى 65% من الطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيل المحطة. (UN WATER & WWAP, 2017, p. 95)

7. خاتمة

اكتسبت معالجة المياه العادمة زخمًا متصاعدًا نتيجة التطور التكنولوجي وما رافقه من زيادة الابتكارات التي انعكست إيجابًا على تحسين تقنيات معالجة المياه العادمة، وعلى طرق تصميم وإنشاء البنية التحتية وتشغيلها مما أحدث تحولًا جذريًا في النماذج المتبعة لإدارتها وسمح بالانتقال من مقارنة المعالجة المحدودة أو التخلص منها إلى مقارنة إعادة الاستخدام والتدوير واستعادة الموارد. يتيح التحول من محطات معالجة المياه العادمة إلى مرافق استعادة موارد المياه استرجاع عدة موارد، يمكن لها أن تولد تدفقًا إضافيًا للإيرادات أو أن تساعد في تقليل

تكاليف التشغيل. تأتي المياه في قمة هرم الموارد المستردة نظرا للحجم الكبير للمياه العادمة المتدفقة حول العال، ويسمح استغلالها في الزراعة وصيانة المساحات الخضراء وفي عدة صناعات من تخفيف الضغط على احتياطات المياه العذبة، خاصة في المناطق التي تعاني من الإجهاد المائي. علاوة على ذلك، يمكن لإعادة التدوير أن تسمح باستعادة مختلف المغذيات كالفوسفور، البوتاسيوم والنيتروجين....، التي تلعب دورا مهما في صناعة الأسمدة، بما يسهم في تغطية نسبة معتبرة من الطلب العالمي على الأسمدة وتوليد إيرادات تقدر على المستوى العالمي بحوالي 13.6 مليار دولار. تتميز محطات المعالجة باستهلاكها الكثيف للطاقة التقليدية، والذي يمكن تقليله من خلال استرداد الطاقة من المياه العادمة في صور متعددة تشمل الغاز الحيوي، الديزل الحيوي، الهيدروجين، الطاقة الكهربائية، الطاقة الحرارية وذلك نظرا لاحتواء المياه العادمة على ما يقرب خمسة أضعاف الطاقة اللازمة لمعالجتها، ويمكن حتى الوصول لتحقيق الاكتفاء الذاتي من الطاقة، أي الحياد الطاقوي أو الوصول لصافي طاقة موجب وتحقيق فائض يمكن بيعه للشبكة. يسهم استرجاع هاته الموارد من المياه العادمة في ظل النهج الجديد في تحقيق الهدف السادس من أهداف التنمية المستدامة ويتعداه ليتقاطع مع أهداف أخرى أبرزها الهدف السابع والثاني عشر والثالث عشر، وبناءً على هذا، أصبح استرداد الموارد من المياه العادمة من التوجهات الداعمة للانتقال نحو الاقتصاد الأخضر وتحقيق الاستدامة والمساهمة في بناء مستقبل أكثر خضرة.

ولكي يتوسع نهج استرداد الموارد من المياه العادمة ينبغي تعزيز الاستفادة من هذه التجارب الرائدة والعمل على تصميم وتطبيق حلول متكاملة وقابلة للتعميم، نورد هنا فيما يلي:

- ✓ تعزيز المعرفة وبناء القدرات المعرفية؛
- ✓ اختيار المواقع المناسبة لإنشاء لمحطات ليتناسب مع المستفيدين من خدماتها؛
- ✓ تشجيع المعالجة من المنبع لتخفيض الآثار البيئية السلبية؛
- ✓ ربط جميع مصادر المياه العادمة بالشبكات الخاصة بمرافق الاسترداد وإصلاح التسربات للوصول للتغطية الشاملة؛
- ✓ إنشاء بنية تحتية مرنة لمحطات معالجة المياه العادمة ذات أنظمة متكاملة تجمع بين المعالجة والاسترداد، بدلاً من تنفيذ مشاريع منفصلة ومحدودة بقطاع واحد؛
- ✓ اختيار أنسب أنظمة المعالجة القادرة على تعظيم استرداد الموارد؛
- ✓ تعجيل تنفيذ ابتكارات استعادة الموارد، لا سيما في البلدان المنخفضة والمتوسطة الدخل حيث لا تزال معظم المياه العادمة تتسرب إلى البيئة دون معالجة محدثة بذلك آثارا بيئية جسيمة؛
- ✓ توفير أطر قانونية ومؤسسية داعمة تصب في إطار تعميم هذا النهج الجديد؛
- ✓ التركيز على الكفاءة الاقتصادية وتحسين الاكتفاء الذاتي الطاقوي لمحطات معالجة مياه الصرف، بالإضافة إلى إمكانية بيع الطاقة الفائضة إلى شبكة الكهرباء؛
- ✓ توحيد جهود الحكومات والقطاع الخاص والباحثين وصناع القرار وأصحاب المصلحة ضمن إطار متكامل يضمن تحقيق الاستدامة وتعظيم الاستفادة من موارد المياه العادمة؛
- ✓ تنسيق الاستثمارات وآليات التمويل بهدف تحسين الأداء العام لأنظمة إدارة المياه العادمة؛
- ✓ رفع الوعي لدى المجتمع لزيادة مستويات القبول.

- Garduño-Jiménez, A.-L., Durán-Alvarez, J.-C., Ortori, C., Abdelrazig, S., Barrett, D., & Gomes, R. (2023). Delivering on sustainable development goals in wastewater reuse for agriculture: Initial prioritization of emerging pollutants in the Tula Valley, Mexico. *Water Research*(238), 119903.
- Karn, A. L., Pandya, S., Mehbodniya, A., Arslan, F., Sharma, D. K., Phasinam, K., . . . Bommiseti, R. K. (2023). An integrated approach for sustainable development of wastewater treatment and management system using IoT in smart cities. *Soft Computing*, 27, 5159–5175.
- Montwedi, M., Munyaradzi, M., Pinoy, L., Dutta, A., Ikumi, D., Motoasca, E., & Bruggen, B. (2021). Resource recovery from and management of wastewater in rural South Africa: Possibilities and practices. *Journal of Water Process Engineering* (40), p. 101978.
- Rezzoug, C., Merzougui, T., & Bouchiba, A. (2025). Wastewater treatment technologies and challenges in Algeria and their future prospects. *Discover Sustainability*(6), 884.
- Shepherd, J., Sohi, S., & Heal, K. (2016). Optimising the recovery and re-use of phosphorus from wastewater effluent for sustainable fertiliser development. *Water Research*(94), 155e165.
- Andersson, K., Rosemarin, A., Lamizana, B., Kvarnström, E., McConville, J., Seidu, R., . . . Trimmer, C. (2020). *SANITATION, WASTEWATER MANAGEMENT and Sustainability:from Waste Disposal to Resource Recovery*. United Nations Environment Programme and Stockholm Environment Institute, Nairobi and Stockholm.
- Benaziza , A., Snoussi, S.-A., & Hadad, A. (2023). contribution à l'analyse de la problématique de réutilisation des eaux usées traitées par les stations de de traitement (STEP) dans la wilaya de TIPAZA. *Revue Agrobiologia*, 13(1), 3314-3321.
- Ganesapillai, M., Vinayak, A. K., Tiwari, A., Darda, A., Chindalia, K., & Chellapandi, T. (2026). Beyond the flush: a review of wastewater circular systems. *npj Clean Water*(9), 31. doi:<https://doi.org/10.1038/s41545-026-00557-8>
- Gude, V. G. (2015). Energy and water autarky of wastewater treatment and power generation systems . *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(45), 52–68. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.055>
- Halkos, G., & Gkampoura, E.-C. (2021). Where do we stand on the 17 Sustainable Development Goals? An overview on progress. *Economic Analysis and Policy*(70), 94–122. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eap.2021.02.001>
- Hao, X., Li, J., Liu, R., & van Loosdrecht, M. (2024). Resource Recovery from Wastewater: What, Why, and Where? *Environ. Sci. Technol*(58), 14065–14067.
- Kerem, A., & Yuce, E. (2022). Electrical energy recovery from wastewater: prediction with machine learning algorithms. *Environmental Science and Pollution Research* 33456789. doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-022-24482-8>

- Mohammadi, R., Tang, W., & Sillanpää, M. (2021). A systematic review and statistical analysis of nutrient recovery from municipal wastewater by electrodialysis. *Desalination*(498), 114626. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114626>
- Obaideen, K., Shehata, N., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Mahmoud, M., & Olabi, A. (2022). The role of wastewater treatment in achieving sustainable development goals (SDGs) and sustainability guideline. *Energy Nexus* , 7, 100112. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100112>
- Qadir, M., Drechsel, P., Cisneros, B. J., Kim, Y., Pramanik, A., Mehta, P., & Olaniyan, O. (2020). Global and regional potential of wastewater as a water, nutrient and energy source. (J. W. Sons, Éd.) *Natural Resources Forum*, 44, pp. 40-51.
- Qiao, L.-L., Guo, J.-S., Fang, F., Chen, Y.-P., & Yan, P. (2024). The recovery potential and utilization pathway of chemical energy from wastewater pollutants during wastewater treatment in China. *Journal of Environmental Management*(356), 120591. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120591>
- Rodriguez, D. J., Serrano, H. A., Delgado, A., Nolasco, D., & Saltiel, G. (2020). *WASTEWATER :From Waste to Resource, Shifting Paradigms for Smarter Wastewater Interventions in Latin America and the Caribbean*. Washington, DC.: International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank.
- Shehata, N., Egirani, D., Olabi, A., Abrar Inayat, A., Abdelkareem, M. A., Chae, K.-J., & Sayed, E. T. (2023). Membrane-based water and wastewater treatment technologies: Issues, current trends, challenges, and role in achieving sustainable development goals, and circular economy. *Chemosphere*(320), 137993. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137993>
- Spellman , F. R. (2013). *Water & wastewater infrastructure: Energy efficiency and sustainability*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- state of green , & Danish Water Forum. (2016). *Unlocking the potential of wastewater: Using wastewater as a resource while protecting people and ecosystems*.
- UN WATER, & WWAP. (2017). *The United Nations World Water Development Report 2017 wastetewater: The Untapped Resource*. Paris.
- UNEP. (2011). *Towards a green economy: Pathways to sustainable development and poverty eradication—A synthesis for policy makers*. . United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland.
- Zarei, M. (2020). Wastewater resources management for energy recovery from circular economy perspective. *Water-Energy Nexus*(3), 170–185.